

# 底層環境改善指標の提案と現地調査によるその推定法に関する研究

## A Study on Remediation Index of Sea Bottom Environment and Its Estimation Method by Field Investigation

重松孝昌<sup>1</sup>・水田圭亮<sup>2</sup>・遠藤 徹<sup>3</sup>

Takaaki SHIGEMATSU, Keisuke MIZUTA and Toru ENDO

Oxygen consumption by bottom sediment in a eutrophied port and harbor is modeled based on field investigation. The model consists of factors of biological contribution and chemical-physical contribution. It is presented that these factors can be estimated by water temperature and dissolved oxygen above the sea bottom. Through modeling sediment oxygen consumption it is found that a penetration depth of oxygen is a useful parameter to represent sea bottom environment as a remediation. Further, estimation method of penetration depth of oxygen is improved to take into the change of the dissolved oxygen above sea bottom consideration.

### 1. 研究の背景と目的

閉鎖性の強い港湾海域における夏期の底層の貧酸素化は極めて劣悪な状態であることはもはや周知の事実であり、その環境改善が急がれている。環境改善のための技術は種々提案されているが、環境構造に応じて適切な技術を選択することが求められるとともに、施工後の具体的な環境改善効果を予測することが求められる。このとき、現状の環境の劣悪度や環境改善効果の検証には、現地における底質直上水中の溶存酸素 (DO) や栄養塩をはじめとする溶存態物質、底生生物の現存量・多様性等が指標として用いられる。しかし、このような指標は時・空間変動が大きいため、現在行われている現地調査の頻度や空間解像度では、目的とする情報を得るには必ずしも適した指標であるとは言い難い。

海域における酸素の動態は、気液界面からの溶解、動・植物プランクトン等の生物による生成・消費、移流・拡散、底質中の生物あるいは化学反応に伴う消費などの諸過程によって決定される。富・過栄養化した閉鎖性海域においては、底質による酸素消費が環境に大きな影響を及ぼすことが多い。相馬ら (2002) や左山ら (2002) は、酸素動態に関わる生物・化学・物理過程をモデル化した内湾複合生態系モデルを構築し、底質による酸素消費メカニズムの詳細を計算している。彼らの検討によれば、有機物や還元物質などが大量に蓄積されている貧酸素化した海底に一時的に酸素を供給しても、それらの分解や酸化反応により忽ち酸素が消費され、底層の水質改善にはつながらないと指摘している。底質によ

る酸素の消費を正確に推定するためには、有機物の沈降フラックスの影響 (たとえば、永尾ら, 2008) や底質直上の流れの影響 (たとえば、井上ら, 1999) 等の諸過程を考慮する必要があるが、それら諸過程の相互作用の結果として、底質内部における溶存酸素の分布状況が決定される。中村 (1996) をはじめ、微小酸素電極を用いて底質内の溶存酸素の分布を詳細に計測している研究例も見られるが、計測器が繊細な構造をしていることや微細構造の計測であるため、操作性の観点から水深が深い港湾海域等において利用するには経済的・技術的に困難であるなどの課題を有していると考えられる。

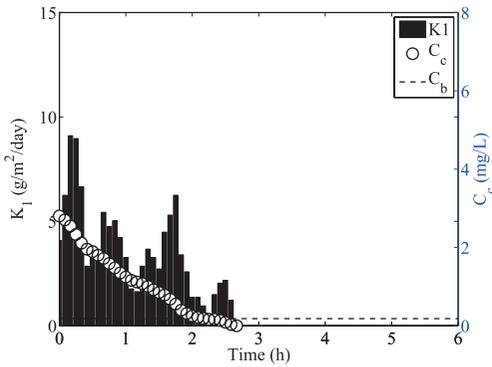
そこで、本研究は、比較的簡便に計測することができるチャンバー法を用いて閉鎖性の強い港湾海域における底質による酸素消費量の現地調査を行い、得られたデータに基づいて、底質による酸素消費モデルを構築するとともに環境改善指標を提案し、その簡易推定法を提案するものである。

### 2. 現地調査概要および計測例

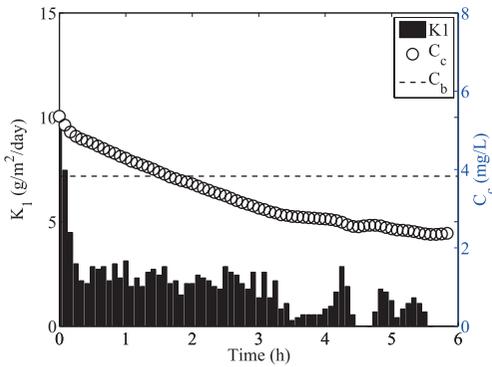
本研究では、1年を通して、ほぼ毎小潮時に、大和川の河口に位置する堺泉北港湾海域北泊地の港口部において、チャンバー法を用いて底質による酸素消費 (DO) 量を測定した。貧酸素化している時季には、チャンバー内の初期DO濃度をある程度回復させてから酸素消費を計測する手法を採用した。詳細は、遠藤ら (2008) を参照されたい。

チャンバー法を用いて底質による酸素消費量を評価する際に、チャンバー内のDO濃度 $C_c$ の時間変化と暗瓶内のそれ $C_w$ との差に、チャンバー容積 $V$  (10 l) を乗じて底面積 $A$  (0.07m<sup>2</sup>) で除することによって、単位面積あたりの底質による酸素消費量を求める方法がある。すなわち、

1 正会員 博(工) 大阪市立大学教授 大学院工学研究科  
2 修(工) パシフィックコンサルタンツ株式会社  
3 正会員 博(工) 大阪市立大学助教 大学院工学研究科

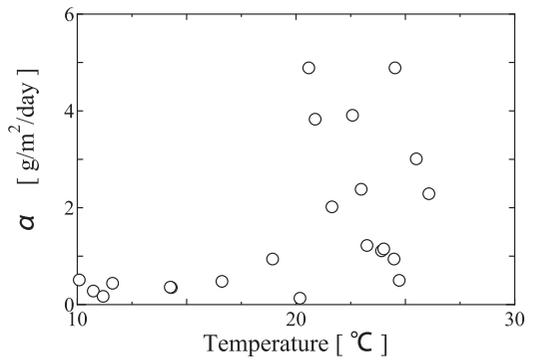


(a) 2008年9月24日

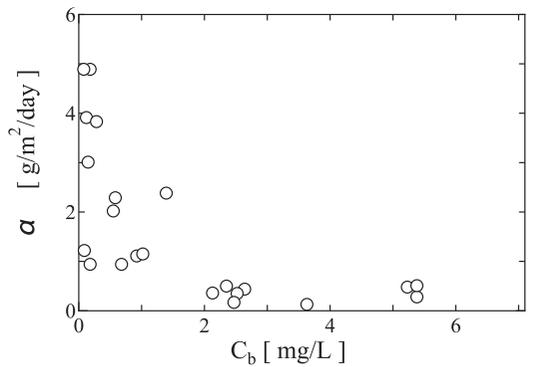


(b) 2008年12月17日

図-1 酸素消費フラックス $K_1$ と $C_c$ の関係



(a) 底層水温



(b) 底層DO

図-2  $\alpha$ と底層DO, 水温の関係

$$-\frac{V}{A} \frac{\partial(C_c - C_w)}{\partial t} = K_1 \dots\dots\dots (1)$$

$$-\frac{V}{A} \frac{\partial(C_c - C_w)}{\partial t} = \alpha + \beta \cdot C_c \dots\dots\dots (2)$$

一般的には、 $K_1$ は酸素消費速度と呼ばれているが、フラックスの単位を有するので、本研究では酸素消費フラックスと称する。図-1は、上式で求められた酸素消費フラックス $K_1$ の計測例を示したものである。図中には、観測日の海底直上のDO濃度 $C_b$ を点線で示している。図-1によれば、貧酸素化している時季の底質による酸素消費フラックス（同図 (a)）は時間あるいはDOによって変化し、貧酸素化が解消している時季の酸素消費フラックス（同図 (b)）は測定時間あるいはDOに関わらずほぼ一定の値を有することがわかる。すなわち、酸素消費フラックスは底層環境の変化に伴って変化するので、これを定量的に評価するためには、底層環境の変化を考慮した定式化が必要であることがわかる。

3. 底質による酸素消費フラックスのモデル化

年間を通じて得られた酸素消費フラックスのデータに基づいて、本研究では、底質による酸素消費量を次式でモデル化することを提案する。

上式中の $\alpha$ はフラックスの、 $\beta$ は速度の次元を有している。現地地で計測された酸素消費フラックスの時間変化から、 $\alpha$ および $\beta$ を回帰的に求めた後、それぞれの係数が表す酸素消費メカニズムの考察とともに、定式化を行った。

(1)  $\alpha$ に関する検討

現地調査で得られた底層水温および底層DO濃度と $\alpha$ との関係を、図-2に示す。同図 (a) に示すように、 $\alpha$ は基本的には水温が高くなると大きな値を示す傾向があるがばらつきは大きい。水温が高い場合にばらつきが大きいのは、水温の上昇による $\alpha$ の増加に反して、海底直上水中のDO濃度 $C_b$ の低下に伴って $\alpha$ が減少するためである。本研究で用いた調査法のように、一時的にDOを高くしても有機物を分解する生物の生息数に大きな影響は与えないであろうこと、その結果、調査時における生物活性によって消費される酸素はほぼ一定と考えられること等から、 $\alpha$ は生物学的な酸素消費フラックスを表す係数であると推察される。このような水温と底層溶存酸素濃度に影響を受けると考えられる $\alpha$ を定式化するため、水

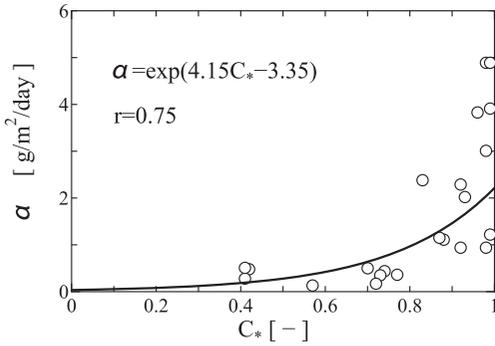


図-3 αとC\*の関係

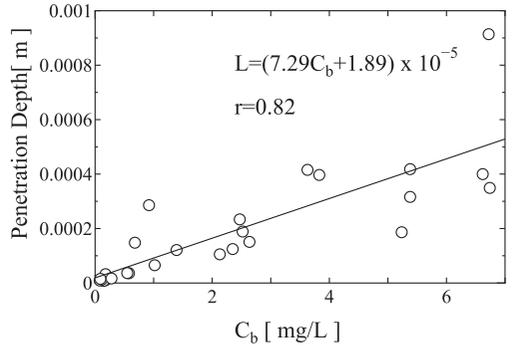


図-4 LとCbの関係

温や塩分からワイズの式によって求められる飽和酸素濃度CsとCbを用いた溶存酸素不飽和度C\*の導入を考える。

$$C^* = \frac{C_s - C_b}{C_s} \dots\dots\dots (3)$$

図-3にαとC\*の関係を示す。同図より、αは、C\*が約0.8以下ではほぼ一定の値を示し、それ以上になると急激に大きくなる傾向があることがわかる。図中の曲線は、指数関数として求めた回帰曲線で、

$$\alpha = \exp(4.15C^* - 3.35) \dots\dots\dots (4)$$

で、相関係数は0.75であった。

(2) βに関する検討

一般的に、海底直上で十分なDOが存在する状態であっても、海底面からある距離Lより下方の間隙中では無酸素状態になっている。このような底質中においてDO濃度が有意な値を有する深さは、酸素浸透深さと呼ばれる。この酸素が浸透している層内では、還元物質の化学反応などによって底質表層から鉛直下向きに酸素が輸送されている。このことを考慮して、本研究では、

$$\beta \cdot C_c = D_{O_2} \frac{\partial C}{\partial z} \dots\dots\dots (5)$$

とモデル化する。ここに、D<sub>O<sub>2</sub></sub>は水中における酸素の分子拡散係数(0.78 × 10<sup>-9</sup> m<sup>2</sup>/s)である。右辺の濃度勾配は底質直上のDO濃度Cbと酸素浸透深さLを用いて表し、Cc = Cbが仮定できるとすれば、

$$\beta = \frac{D_{O_2}}{L} \dots\dots\dots (6)$$

としてβをモデル化することができる。

ここで、Caiら(1996)に倣ってLを推定した。

$$L = 2\phi D_{O_2} \frac{C_b}{K C_b} \dots\dots\dots (7)$$

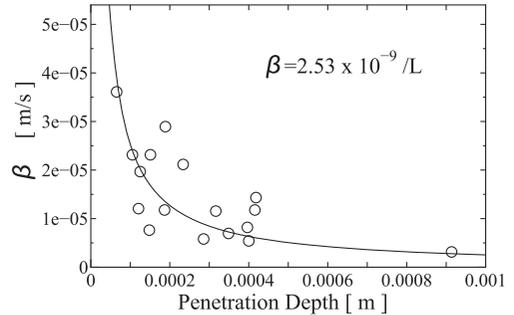


図-5 Lとβの関係

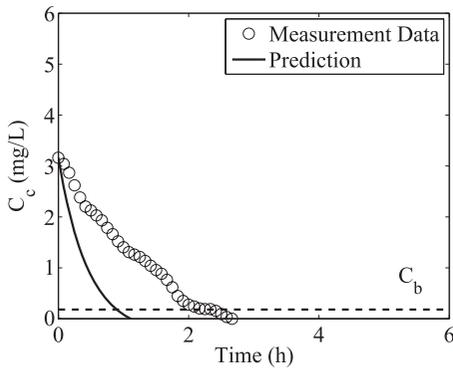
ここに、φは底質の間隙率(相馬ら(2002)に倣ってφ=0.9とした)、K<sub>C<sub>b</sub></sub>はチャンパー内のDOがCc=Cbとなったときの酸素消費フラックスである。図-4は、LとCbの関係を示したもので、図中の直線は

$$L = (7.29C_b + 1.89) \times 10^{-5} \dots\dots\dots (8)$$

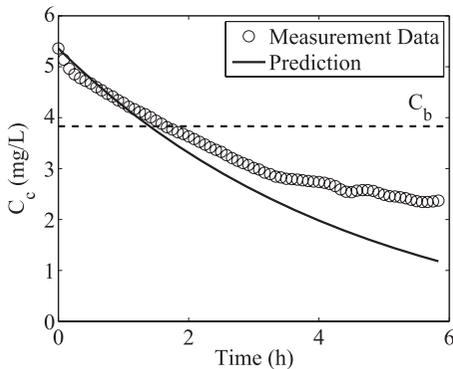
で表される回帰式で、相関係数は0.82であった。このようにして求めたLとβの関係を図-5に示す。多少のばらつきはあるものの、βはこのようにして求められたLを用いておおむね推定が可能であると考えられる。

(3) モデルの検証

上記で提案する底質酸素消費モデルは、富・過栄養化した港湾海域の底質直上の水温とDO濃度を計測すれば、おおよその酸素消費フラックスを推定できる手法である。本モデルの検証を、実測したチャンパー内の溶存酸素濃度Ccの時間変化を再現することによって検証した。検証結果の一例を、図-6に示す。同図(a)は、底層が貧酸素化している時季における検証結果を、同図(b)は貧酸素化が解消している時季の結果である。貧酸素化が解消している時季の結果と比較すると、貧酸素化時の推定精度は良好であるとは言い難い。(ただし、同図(a)の結果は、貧酸素化時の最良の代言結果の一例ではない。)このことは、貧酸素時におけるモデルの改善が必要であることを示唆していると考えられる。上記の手法



(a) 2008年9月24日



(b) 2008年12月17日

図-6  $C_c$ の時系列変化の再現

は、チャンパー内のDO濃度 $C_c$ を、一時的に、海底直上水中のDO濃度 $C_b$ よりも高くとした後に酸素消費フラックスを計測している。このとき、計測期間中に酸素浸透深さ $L$ は時々刻々と変化しているにも関わらず、酸素浸透深さ $L$ を一定として推定していることに課題があると推察される。

(4) 酸素供給に伴う底質酸素消費フラックスの変動予測

本モデルを用いて、本研究で調査を実施した底層環境(貧酸素化した状態)の下で、底層にDO ( $C_b$ ) を供給して一時的にDOを $3\text{mg}/\ell$ まで回復させた直後の酸素消費フラックスを推定した結果を、図-7に示す。図中には、その推定結果を $\Delta$ で、各測定日における酸素消費フラックスの現状を $\circ$ で示している。このとき、酸素供給直後の酸素消費量の推定においては、調査時の $C_b$ を用いて酸素浸透深さ $L$ を求めている。図-7によれば、底層の貧酸素化が深刻な時季に $C_b$ を一時的に回復させても、現状の酸素消費と比較すると大量の酸素が消費されることが予想される。

次に、十分な時間、酸素供給を行うことによって酸素供給を絶った後も $C_b=3\text{mg}/\ell$ が達成された場合の酸素消

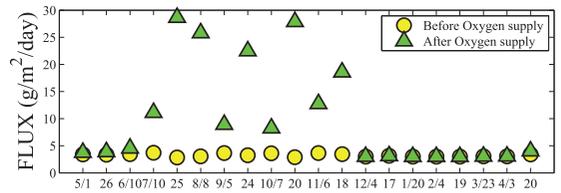


図-7 貧酸素化時および酸素供給直後の酸素消費フラックスの比較

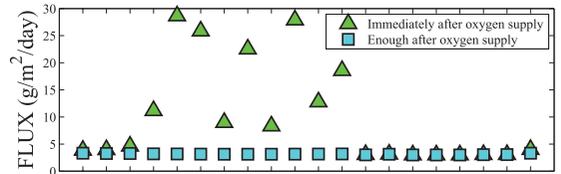


図-8 酸素供給直後と酸素を十分に供給した後の酸素消費フラックスの比較

費フラックスを推定した。このとき、酸素浸透深さ $L$ は $C_b=3\text{mg}/\ell$ として求めている。すなわち、前述の場合との相違は、酸素浸透深さ $L$ の相違のみによってもたらされていることになる。図-8には、十分に酸素供給した後の酸素消費フラックスの推定値( $\square$ 印)を、貧酸素時に酸素供給を行った場合酸素消費フラックスの推定値( $\Delta$ 印)とともに示す。図-8より、十分に酸素供給した後は、特に貧酸素化している時季の酸素消費フラックスが大きく低下することがわかる。

このような推定結果は、貧酸素化した海域で底層に酸素供給を行う場合には、酸素浸透深さが十分な厚みに回復するまで酸素供給を続けなければならないことを示唆している。すなわち、底質による酸素消費を低減させるためには酸素浸透深さを大きくすることが重要であることを、ひいては、底質環境改善指標として酸素浸透深さが有用であると判断される。

(5) 動的酸素浸透深さモデルの検討

本研究で提案した酸素消費モデルは、現地における酸素消費フラックスの経時変化から、その環境における酸素浸透深さを推定しているが、前述のように、貧酸素化改善技術を評価する際に本酸素消費モデルを適用する場合には、環境の変化に応じて酸素の浸透深さが時間的に変化する過程が考慮できる事が望ましい。そこで、直上水の環境変化に応じて酸素浸透深さが動的に変化することができるようにモデルの改良を試みた。

式(8)を用いて、海底直上水 $C_b$ の変化に応じて酸素浸透深さ $L$ を更新し、酸素消費フラックスを求めればよい。このとき、どの程度の時間間隔で酸素浸透深さ $L$ を更新するかによって、酸素消費フラックスの推定結果が異なる。もちろん、更新時間間隔が十分小さければ同じ

結果が得られるが、効率的な更新頻度を求めておくことが望ましい。本研究では、酸素の浸透深さの時間的な変化を考える際に、気液界面のガス交換における表面更新説の概念を援用した。表面更新説によれば、気液界面における物質移動係数 $K_L$ は以下のように示される。

$$K_L = 2\sqrt{\frac{D}{\pi\tau}} \dots\dots\dots(9)$$

ここに、 $D$ は分子拡散係数、 $\tau$ は表面更新時間である。いま、底質表層の酸素侵入部が直上の溶存酸素濃度の影響を受けて変化するとすれば、 $K_L$ と $\beta$ の特性アナロジーより、 $\beta$ は以下のように推定される。

$$\beta = 2\sqrt{\frac{D}{\pi\tau}} \dots\dots\dots(10)$$

式(10)を展開すると酸化層の厚さが更新される時間 $\tau$ は以下のように示される。

$$\tau = \frac{4D}{\pi\beta^2} \dots\dots\dots(11)$$

このようにして酸素浸透深さ $L$ の更新時間 $\tau$ を求めた後、 $\tau$ ごとに酸素の浸透深さ $L$ を動的に変化させて、チャンパー内の溶存酸素濃度の時系列変化の予測を行った。

図-9は、図-6(a)で示した場合について、ここで記した動的酸素浸透深さモデルを適用した結果を示したものである。図-6(a)で示されている $C_c$ の推定値と、図-9で示されているそれとの相違は、差分法を用いてチャンパー内の溶存酸素濃度 $C_c$ をも計算していることによるものであることを注記しておく。同図より明らかのように、酸素浸透深さ $L$ が動的に計算されることにより、酸素浸透深さが増大し、底質間隙内と底質直上水との間の濃度勾配が緩やかになり、その結果として酸素消費が遅くなる傾向が示されている。すなわち、酸素浸透深さを動的に変化させて底質による酸素消費フラックスを予測する手法は有用であると言える。

**4. 結論**

本研究は、従来用いられている計測法のひとつであり、また、簡便に底質による酸素消費フラックスを計測することができるチャンパー法を用いて、港湾海域における底質による酸素消費フラックスの時間変化を求め、得られたデータに基づいて、年間を通じた酸素消費フラックスを推定することができる酸素消費モデルを提案した。海域に応じて提案した酸素消費モデル中の係数を定めることができれば、海底直上の水温と溶存酸素濃度を計測することによって、酸素消費フラックスを推定することが可能であることを示した。これによって、複雑な生態

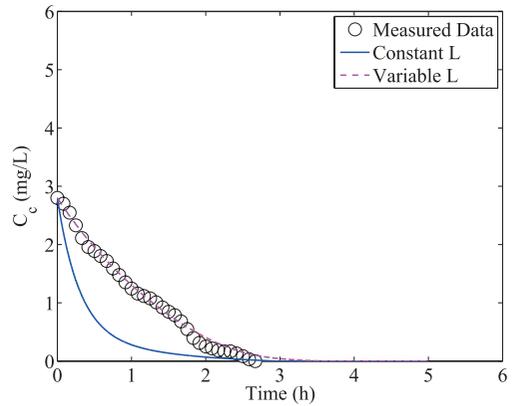


図-9  $\tau$ を用いたときの $C_c$ の予測

系モデルや高価な計測機器を用いることなく底質内の溶存酸素環境を表す酸素浸透深さを推定できることを明らかにした。また、モデル化の過程やモデルを用いた底質環境改善による酸素消費フラックスの変化予測を通して、底質中の酸素浸透深さが、底質環境の実情および底質環境改善効果を表す指標として有用な指標であることを示した。さらに、直上水中のDO濃度の変化に応じて酸素浸透深さが変化する動的酸素消費モデルを提案し、より実用性の高いモデルへと改善した。

**謝辞：**本研究の一部は、科学研究費補助金・基盤研究(B)(代表者：中尾正喜)の補助を受けて遂行された。ここに記して謝意を表する。

**参 考 文 献**

井上徹教・中村由行・足立義彦(1999)：環境条件のステップ的な変化に伴う堆積物の酸素消費・リンの溶出の応答，水工学論文集，第43巻，pp. 1013-1018.  
 遠藤 徹・水田圭亮・重松孝昌(2008)：貧酸素化した港湾海域における底質の酸素消費特性に関する研究，海岸工学論文集，第55巻，pp. 106-1070.  
 左山幹雄・相馬明郎・高杉由夫(2002)：沿岸域の水-堆積物界面近傍における酸素の動態に対する流速の影響の実験的解析，海岸工学論文集，第49巻，pp. 996-1000.  
 相馬明郎・左山幹雄(2002)：酸素・窒素・炭素動態の鉛直微細構造を表現する沿岸堆積物表層物質循環モデルの開発，海岸工学論文集，第49巻，pp. 1231-1235.  
 中村由行・井上徹教・Fatos Keciku・左山幹雄(1996)：微小酸素電極を用いた濃度境界層の微細構造の把握，海岸工学論文集，第43巻，pp. 1081-1085.  
 永尾謙太郎・畑 恭子・芳川 忍・細田昌広・藤原建紀(2008)：水質改善の評価を目的とした浮遊系-底生系結合モデルの開発と適用，海岸工学論文集，第55巻，pp. 1191-1195.  
 Cai Wei-Jun, Frederick L. Sayles(1996)：Oxygen penetration depths and fluxes in marine sediment, Marine Chemistry, Vol. 52, pp. 123-131.